

# エアートラックを利用したエネルギー変換の実験

笠 原 俊 男\*

この研究は、エアートラックの特性を検討し、それを基に中学校「運動とエネルギー」の学習で、エアートラックを用いる実験を試みた。特に、エアートラックとばね、落下球振り子などを組み合わせた装置を用い、力学的エネルギーの変換過程を視覚化させる実験を検討した。

## 1. は じ め に

中学校新学習指導要領の第一分野「(6) 運動とエネルギー」で取り扱う「運動」は、等速直線運動と落下運動である。「エネルギー」については、力学的エネルギーが中心である。また、エネルギー変換についても軽くふれることになっている。

エアートラックは、中学校の理振法の品目にはないが、「力と運動」の基本概念を育てるのに効果的な装置であると考ええる。そこで、初めに、エアートラックの特性を明らかにし、次に、その特性を生かしながら慣性の法則や速さの変化する運動、及び、力学的エネルギー変換の実験法を検討した。

## 2. エアートラックの特性

### (1) 装置の全体構成

使用した装置の全体構成を図1に示した。

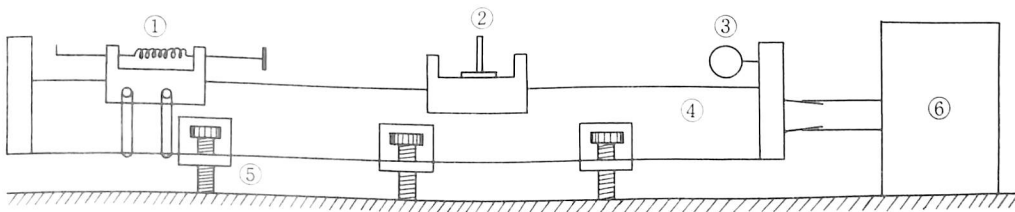


図1 装置の全体構成

- ① 滑走体定速度発射装置 ② 滑走体（質量 100 g）③ 反ばね ④ 滑走台（全長 231 cm）  
⑤ 水平調節ねじ ⑥ 送風器（100 V, 300 W）

### (2) 滑走体の走行性

#### ① 滑走体の速度と空気抵抗

\* 理科長期研修員（柏崎市立科学技術教育センター，柏崎市立第一中学校）

滑走体は、走行時に空気抵抗を受ける。特に、滑走体におもりを乗せたとき空気抵抗は増す。そこで、滑走体の速度と空気抵抗の関係を、図2の(B)、(C)のパラグラス板を滑走体の前面にとりつけて測定した。測定結果を図3に示した。(A)は滑走体の横断面図である。

測定結果より、次の事項が指摘できる。

ア、パラグラス板の面積が大きいほど、低速度でも空気抵抗は大きい。滑走体に100g、200gのおもりを乗せた場合の空気抵抗は、それぞれ、およそ(B)、(C)に相当する。

イ、(A)、(B)、(C)ともに空気抵抗は、高速部で速度の2乗に比例し、低速部で速度に比例する。

## ② 滑走体の質量と送風量

滑走体のおもりを増すとき、必要送風量は大きくなる。

## ③ 滑走台のたわみによる影響

滑走台の支点と支点の間はたわみがちで、その間で、滑走体は、往復運動をすることがある。

## ④ 滑走体の横振れ

滑走台の穴から吹き出す風圧のちがいににより、滑走体は横振れ運動を起こす。したがって、ゆっくりした運動を1m以上わたって測定することは、精度に欠ける。

## (3) 反ばつばねの特性

後述の4(4)の実験から、反ばつばねのはねかえり係数 $e$ を測定した結果、 $e = 0.95$ を得た。

## (4) 滑走体定速度発射装置

### (a) 装置の原理と構造

定速度発射装置の略図を図4に示した。この装置は、力学的エネルギーの変換実験に使用するものであるが、滑走体の定速度発射装置として使用できる。操作は、ばねに一定の伸びを加えた糸を、はさみで切って打ち出す。

### (b) 装置の特性

ばねの伸びに対する速度の関係を図5に示した。

なお、ばね定数 $k$ は、 $26.5\text{ N/m}$ であった。この装置では、ばねの位置エネルギーが滑走体の運動エネルギーに完全には変換されない。その原因については、後述の実験例のところでふれる。

## 3. 滑走体の速度測定装置

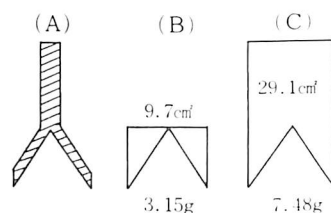


図2 パラグラス板の形

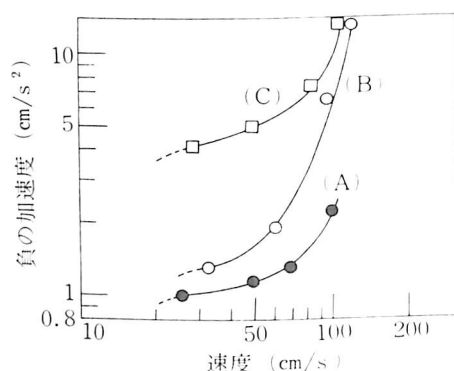


図3 速度と加速度

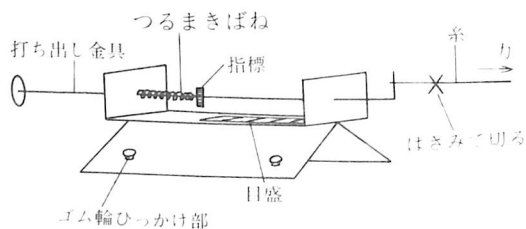


図4 定速度発射装置

### (1) 装置のねらい

暗室でストロボ写真を撮影し、写真から滑走体の速度を測定する方法は煩雑で、1時間の学習時間では無理がある。手軽に明るい部屋で滑走体の速度測定を可能にするために、電気式ストップウォッチと組み合わせるマイクロスイッチ法、及び、光電リレー法を試みた。

### (2) 装置の原理と構成

この装置は、一定距離を滑走体が走るに要する時間を測定するものである。

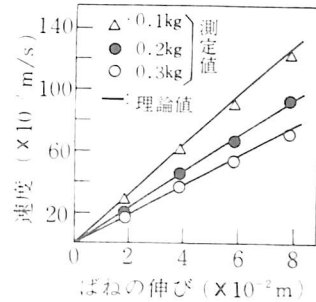


図5 のびと速度

#### (a) マイクロスイッチ法

マイクロスイッチ法を図6に示した。滑走体がAのスイッチを離れるとタイマーが作動し、Bのスイッチに着くとタイマーが止まる。

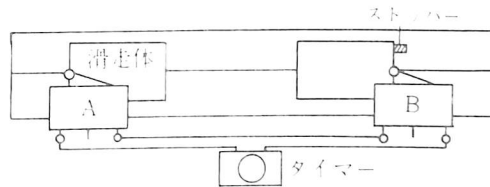


図6 マイクロスイッチ法

#### (b) 光電リレー法

光電リレー法を図7に示した。滑走体が発車するとCdSに光が入り、リレーがはたらいでタイマーが作動する。滑走体がストッパーで停止して遮光すると、タイマーが止まる。

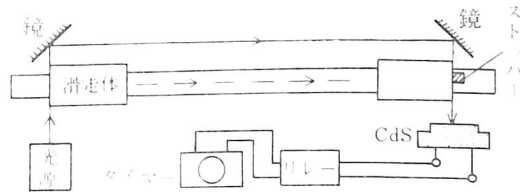


図7 光電リレー法

### (3) 装置の特性

本装置の測定例を表1に示した。表には特性比較のため、手動ストップウォッチによる値も併記した。

#### (a) マイクロスイッチ法

この方法では、マイクロスイッチで滑走体の片面を押すため、発車時に横振れ運動が起こりやすく、リレーとの摩擦が若干ともなうのが欠点である。

#### (b) 光電リレー法

この方法は、光軸合わせが、ややむずかしいが、ばらつきの少ない測定値が得られる。

表1 滑走体の通過時間の比較

(滑走距離0.6m、質量0.225kg、5回計測)

測定法	マイクロスイッチ法	光電リレー法	手動ストップウォッチ
平均(秒)	1.97	1.99	2.13
標準偏差	0.054	0.008	0.13

## 4. エネルギー変換に関する実験例

これまで述べた装置の特性を生かし、次の(1)~(4)の力学的エネルギー変換の実験を試みた。これらの実験は、いずれも、生徒に力学的エネルギー変換を視覚的にとらえさせることを指導上のねらいとしているが、本研究では、その基礎資料を得るため、やや厳密な測定をし、検討を加えた。

## (1) ばねと滑走体のエネルギー変換

## (a) 指導のねらい

この実験は、ばねの位置エネルギーが、滑走体の運動エネルギーに変換される過程を、視覚的にとらえさせるためのものである。

## (b) 理論

この実験では、発射装置の摩擦、ピストン・ばねの運動エネルギーの影響があって、ばねの位置エネルギーは完全に滑走体の運動エネルギーに変換されない。

したがって、ばねの有効な位置エネルギー  $U_p$  は、ばね定数を  $k$ 、有効な伸びを  $x$  とすれば、次式で示される。

$$U_p = \frac{1}{2} kx^2 \dots \dots \dots (1)$$

一方、滑走体を得る運動エネルギー  $U_k$  は、 $U_p$  からピストン・ばねの運動エネルギー  $U'_k$  を差し引いたものである。

$$U_k = U_p - U'_k \dots \dots \dots (2)$$

そこで、滑走体の質量を  $M$ 、ピストンの質量に、ばねの質量の  $1/3$  (有効質量) を加えたものを  $m$ 、滑走体の速度を  $v$  とすると、 $U_k + U'_k$  は次式で示される。

$$U_k + U'_k = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} mv^2 \dots \dots \dots (3)$$

式(1)~(3)より、次の  $v$  と  $x$  の関係式を得る。

$$\frac{v}{x} = \sqrt{\frac{k}{M+m}} = \text{一定} \dots \dots \dots (4)$$

また、エネルギー変換率  $r = U_k / U_p$  は、次式で示される。

$$r = \frac{M}{M+m} \dots \dots \dots (5)$$

## (c) 測定法

図1、図4の装置を用いて、滑走体の運動をストロボ写真(1/10秒)に撮影して解析した。

## (d) 結果と考察

得られた速度をもとにして換算したばねの位置エネルギーと滑走体の運動エネルギーの関係を、図9図10に示した。

## ① ばねの伸びと速度

前項に記した図5は、ばねの伸びと滑走体の速度が比例することを示している。これは、式(5)と一致する。

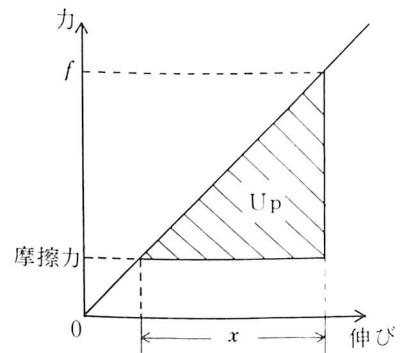


図8 ばねの有効エネルギー

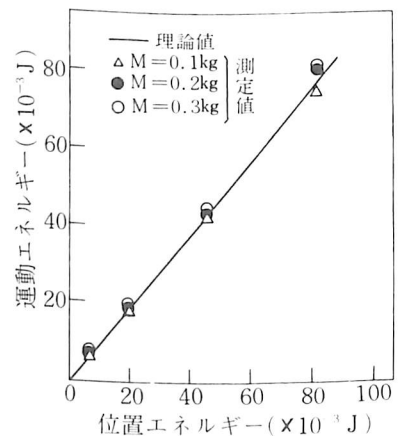


図9 位置エネルギーと運動エネルギー

## ② エネルギー変換率

図9の実線は、 $r=1$ の値である。図は、ばねの位置エネルギーが滑走体の運動エネルギーに効率よく変換されることを示している。

質量と変換率の関係は、図10に示した。図10の実線は、 $m$ を0.014kgとしたときの理論値である。測定値は、測定誤差の範囲で理論値と一致する。

この実験は、変換率を考えなければ、中学校において、効果的なデモンストレーションとして利用できる。

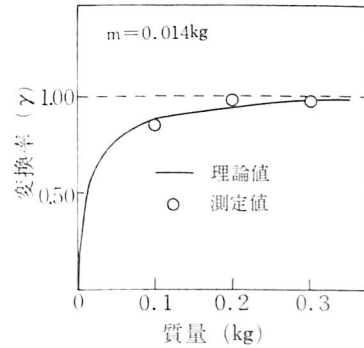


図10 質量と変換率

## (2) 斜面落下体と滑走体のエネルギー変換

### (a) 指導のねらい

この実験は、斜面上にある鋼球のもつ位置エネルギーが、鋼球の運動エネルギーに変換され、さらに滑走体の運動エネルギーに変換されていく過程の視覚的効果をねらったものである。

### (b) 理論

#### ① 落下過程

落下過程では、球の位置エネルギー  $U_p$  は、運動エネルギー  $U_k$ ，回転エネルギー  $U_\omega$ ，斜面との摩擦による熱エネルギー  $U_t$  に変換される。

$$U_p = U_k + U_\omega + U_t \quad \dots\dots\dots (6)$$

いま、球の質量を  $m$ ，半径を  $a$ ，回転半径を  $r$ ，出発時の高さを  $h$ ，最終速度を  $v_0$  とし、球はすべらないとすると各エネルギーは、次式で示される。

$$U_p = mgh \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$U'_k = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$U_\omega = \frac{ma^2}{5r^2} v_0^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$U_t = \frac{2}{7} mgh \quad \dots\dots\dots (10)$$

#### ② 衝突過程

この衝突は、非弾性衝突であるため、衝突時に  $U'_k$  の一部は熱エネルギー  $U_t$  に変換される。したがって、滑走体が球を抱えて走る運動エネルギー  $U_k$  は、次式で示される。

$$U_k = U'_k - U_t \quad \dots\dots\dots (11)$$

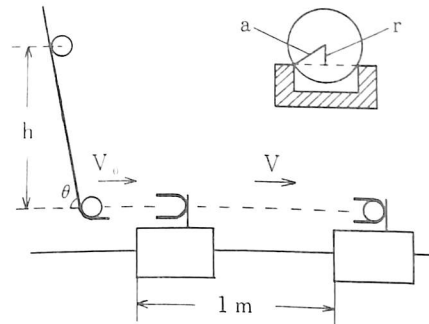


図11 実験装置模式図

表2 実験条件

$m$	0.045kg
$M$	0.180kg
$a$	$1.11 \times 10^{-2} \text{m}$
$r$	$0.914 \times 10^{-2} \text{m}$
$h$	$(10 \sim 40) \times 10^{-2} \text{m}$
$\theta$	$6.0^\circ$

また、滑走体の質量を  $M$  とすると、滑走体の速度  $v$  は、運動量保存法則より、次式が得られる。

$$v = B\sqrt{h}$$

ただし、 $B = \frac{m}{M+m} \sqrt{\frac{50\tau^2 g}{7(5+2a^2)}} \dots\dots(12)$

### ③ エネルギー変換率

エネルギー変換率  $r$  は、式(6)~(12)より、次式で与えられる。

$$r = \frac{M+m}{2mg} B^2 \dots\dots(13)$$

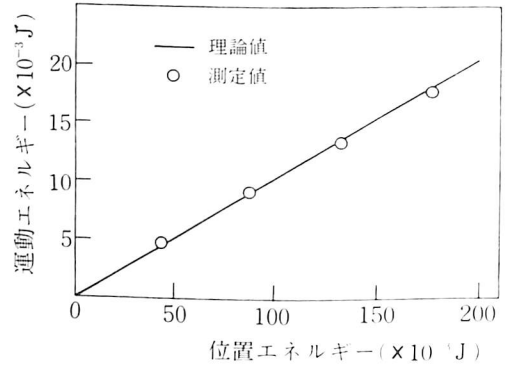


図12 エネルギー変換

### (c) 測定法

図11の装置を用い、斜面をころがり落ちる球を滑走体に衝突させ、滑走体の速度を図6のマイクロスウィッチ法で測定した。実験条件は、表2に示した。

### (d) 結果と考察

得られた速度から算出した滑走体の運動エネルギーと、鋼球の位置エネルギーの関係を図12に示した測定結果は、理論値  $v=0.59\sqrt{h}$  (m/s),  $r=0.09$  とほぼ一致する。理論値に比べて、 $v$  は3%  $r$  は10%小さい値であるが、その原因は検討中である。

この実験は、滑走体の運動エネルギーへの変換率が非常に小さいのが欠点である。しかし、水力発電の水車モデルとして、演示実験に適している。なお、滑走体は、最初、静止させておくので、マイクロスウィッチ法が適している。

## ③ 振り子と滑走体のエネルギー変換

### (a) 指導のねらい

この実験は、エアートラック上で、滑走体に等質量の振り子が弾性衝突したとき、滑走体を介して他方の振り子が打ち上げられるというエネルギー相互変換の過程を視覚的にとらえさせることをねらったものである。

### (b) 理論

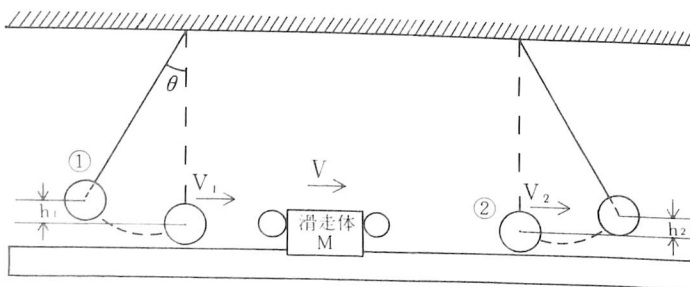


図13 エネルギー相互変換実験装置

表3 実験条件

$m$ : 振り子の質量
$m = M = 0.1 \text{ kg}$
$\ell = 0.5 \text{ m}$
支点間距離 : $0.73 \text{ m}$
$\theta = 10^\circ \sim 40^\circ$

図13において、①、②のそれぞれの振り子の長さを  $l$  とする。いま、振り子①が支点の真下に来たときの速度を  $v_1$  とすると、 $v_1$  は次式で示される。

$$v_1 = \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)} \quad \dots\dots\dots 14$$

ばねのはねかえり係数  $e$  を 1、滑走体の質量を  $M (= m)$  とすると、速度  $V$  は、次式で示される

$$V = v_1 \quad \dots\dots\dots 15$$

次に、滑走体が振り子②に衝突したときの振り子②の速さ  $v_2$  は  $v_1$  と等しく、また、振り子②は  $h_1$  と等しい高さ  $h_2$  まで打ち上げられる。すなわち、次式が成り立つ。

$$h_2 = h_1 \quad \dots\dots\dots 16$$

#### (c) 測定法

振り子は、同一平面上を振らせるため、 $\Gamma$ 字形にたこ糸をつるした。おもりは、市販のピンポン球に小鋼球を入れたものを使用した。

振り子と滑走体の運動は、流しカメラを用い、ストロボ撮影した。なお、振り子は電磁石で保持し、発射させた。実験条件は、表3に示した。

#### (d) 結果と考察

撮影例を図14に、 $\sqrt{h}$  と  $V$  の関係を図15に示した。

図14から、位置エネルギー  $\leftrightarrow$  運動エネルギー  $\leftrightarrow$  位置エネルギーの変換の過程が、明確に読みとれる。

図15より、滑走体の速度  $V$  は  $\sqrt{h}$  に比例するが、 $h_1$  は、6.8 cm が限界である。したがって、振り子の振幅を  $30^\circ$  以内にして実験すると、エネルギーの相互変換がスムーズに行われる。しかし、2往復が限度である。

また、この実験は、振り子1個と滑走体の衝突実験としても利用できる。その場合には、ストロボ写真でなくて、光電リレー法を使ってもよい結果が得られた。

#### (4) 斜面上の滑走体のエネルギー変換

##### (a) 指導のねらい

この実験は、エアートラックを傾斜させて、位置エネルギー  $\leftrightarrow$  運動エネルギー  $\leftrightarrow$  位置エネルギーの変換過程を観察するとともに、ゆっくりした加速度運動を観察することがねらいである。

##### (b) 理 論

斜面上の滑走体の出発点の高さを  $h$ 、はね返って、再び最高点に達した高さを  $g$  とすると、はねかえり係数  $e$  は次式で示される。

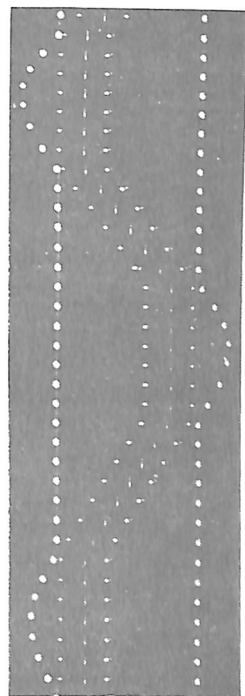


図14 エネルギー相互変換  
(発光間隔 1/10 秒)

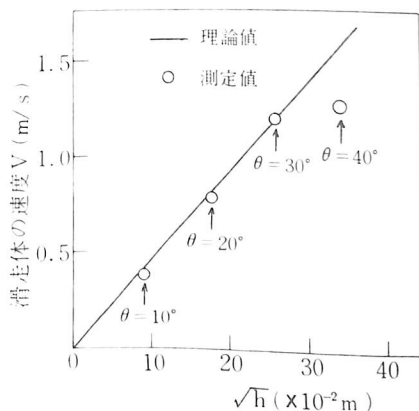


図15 高さ と 速度

$$e = \sqrt{\frac{h'}{h}} \dots \dots \dots (17)$$

ここで、 $e = 1$  の場合は、 $h'$  は  $h$  と等しくなる。

$$h' = h \dots \dots \dots (18)$$

#### (c) 測定法

エアートラックの支点間の距離を1.53mにしてエアートラックを傾斜させ、流しカメラを用い、ストロボ撮影した。

#### (d) 結果と考察

斜面の傾斜角と加速度の関係を図16に、撮影例を図17に示した。

図16より、傾斜角が $0.5^\circ \sim 4.0^\circ$ の範囲で、測定値は理論値と一致する。

ばねのはねかえり係数は、図16より、0.95を得た。(この値は、前述の2(3)で使用した。)

この実験は、「ゆっくりと速さの変わる運動」を演示するのに、効果的と考えられる。

### 5. おわりに

エアートラック、滑走体の定速度発射装置、滑走体の記録装置の特性を調べ、その特性を生かしながら、力学的エネルギーの変換を示す4つの実験例を示した。特に、この研究では、指導上の基礎資料を得るために、力学的エネルギーの変換を精密に追求した。これらの実験を実際の授業で手軽に実験するには、測定装置は手動ストップウォッチで十分であり、効果的な実験と考えられる。

これらの実験は、中学理科におけるデモンストレーションとして検討してきたが、高校理科Ⅰ「力とエネルギー」の学習でも十分使用できよう。

今後は、現場での実践を通して、さらに、エアートラックの利用法を検討していきたい。

### 参考文献

- 1) 文部省：中学校理科指導書(1978)
- 2) 金原寿郎：基礎物理学(上・下)，裳華房(1978)
- 3) 新井はか：物理教育 21, 3(1974), 45~47
- 4) 安達はか：物理教育 23, 2(1975), 11~12

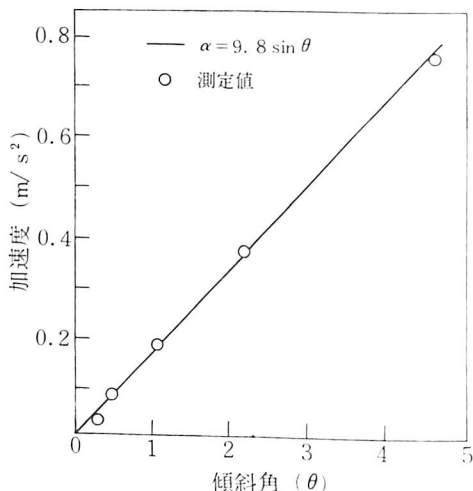


図16 傾斜角と加速度の関係

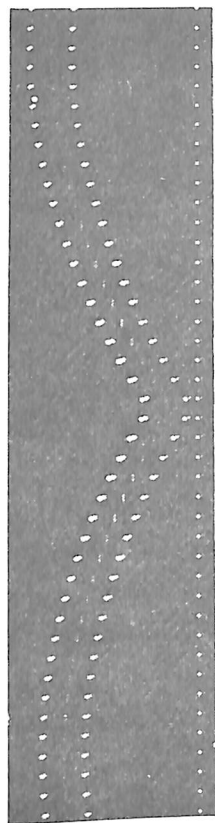


図17 エネルギー変換